

ВІДГУК

офіційного опонента д. т. н., проф., Вісьтак Марії Володимирівни на дисертацію Дзундзи Богдана Степановича «Твердотільні термо- і фотоелектричні перетворювачі енергії та сенсорні елементи на основі модифікованих структур телуридів», представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01 - твердотільна електроніка.

1. Актуальність дисертаційного дослідження.

Однією з важливих проблем твердотільної електроніки є розробка і виготовлення високоефективних твердотільних перетворювачів енергії. З кожним роком частина енергії, яка виробляється з відновлюваних джерел, постійно зростає, як і кількість досліджень у даній сфері. Актуальною науковою проблемою є дослідження термоелектричних перетворювачів як альтернативних джерел енергії, охолоджувачів та високочутливих температурних сенсорів. Термоелектричні перетворювачі є одним із перспективних, а в деяких випадках єдиним доступним джерелом електричної енергії. Активно досліджуються сполуки типу A^4B^6 завдяки перспективі їх використання як термоелектричних перетворювачів енергії, так і для створення детекторів ІЧ-діапазону оптичного спектру, а сполуки типу A^2B^6 – для створення на їх основі сонячних елементів другого покоління. Уже багато років ведеться пошук матеріалів з покращеними термоелектричними властивостями і розроблена велика кількість як матеріалів, так методів дослідження. Однак досі існує потреба в підвищенні термоелектричної ефективності перетворювачів енергії. Особливо це стосується тонкоплівкових структур, властивості яких значно відрізняються завдяки впливу поверхні та розмірних ефектів.

Також, заслуговує уваги дослідження біомедчного спрямування, метою яких є впровадження неінвазивних методів, що дають можливість неперервного моніторингу різних параметрів стану пацієнта, а саме частоти серцевих скорочень, сатурації крові, рівня глюкози крові людини та інших параметрів, що незважаючи на меншу точність, перевищують класичні інвазивні методи за ефективністю.

Таким чином, тема дисертаційних досліджень Дзундзи Б. С. є актуальною задачею, розв'язанню якої присвячена його робота.

2. Достовірність та обґрунтованість наукових результатів, отриманих в дисертаційній роботі, базуються на:

- детальному аналізі літературних джерел, де висвітлено результати досліджень і сучасні уявлення щодо стану проблеми впливу хімічного складу та технологічних факторів одержання на термоелектричні та фотоелектричні параметри плівок телуридів;

- великому обсязі експериментальних досліджень, одержаних з

використанням сучасного науково-дослідного обладнання;

- відмінній узгодженості експериментальних даних з результатами математичного моделювання та даними наявними в науковій літературі.

Отримані результати не суперечать відомим науковим та методологічним підходам, а частина результатів дисертаційного дослідження також підтверджена практичним впровадженням.

Сформульовані висновки висвітлені у логічній послідовності до змісту дисертаційної роботи. Вони ґрунтуються на великому обсязі експериментальних відтворюваних результатів та підтверджуються теоретично.

3. Наукові положення, розроблені особисто дисертантом

Всі положення і результати, сформульовані автором у пункті “Наукова новизна”, є новими і вперше отримані та описані Дзундзою Б.С. зі співавторами. Особистий внесок автора наведений для кожної статті, академічного плагіату не виявлено. Зокрема дисертантом особисто проведено обґрунтування способів підготовки досліджуваних зразків, добору режимів і проведення технологічних процесів, вдосконалено методики та розроблено засоби дослідження термоелектричних і фотоелектричних властивостей напівпровідникових матеріалів на основі сполук терлуридів. Проведені дослідження властивостей тонкоплівкових термоелектричних і фотоелектричних матеріалів, виготовлення на їх основі приладів, комп'ютерна обробка одержаних результатів та розрахунок основних параметрів.

До найважливіших результатів дисертаційної роботи можна віднести наступні:

- встановлення впливу технологічних факторів, поверхні, міжзеренних меж та розмірних ефектів на термоелектричні властивості тонкоплівкових напівпровідникових структур;
- розроблена концепція ІЧ-сенсора, конструкція термоелектричного охолоджувача та програмно-апаратна система керування багатоступеневим криогенним термоелектричним охолоджувачем, необхідним для роботи ІЧ-сенсора;
- запропонована концепція сенсорної мікросистеми для біомедичних застосувань.
- розроблена функціонально-електрична схема інтегрального перетворювача сигналів від фоточутливих елементів на основі КМОН-операційних підсилювачів, що призначений для побудови елементної бази гібридних сенсорних мікросистем для біомедичних застосувань.

4. Повнота опублікування основних результатів дисертації

Новизна та актуальність роботи підтверджуються 52 науковими працями (чотири з яких одноосібні) – 35 статей у фахових виданнях (23 з яких входять до міжнародної наукометричної бази Scopus), 11 матеріалів наукових конференцій, отримано 4 патенти України на винахід та 2 патенти України на корисну модель.

Результати досліджень опубліковані у наступних головних рейтингових виданнях: “*Journal of Power Sources*”, “*Sensors (Switzerland)*”, “*Physica B: Condensed Matter*”, “*Energies*”, “*Materials Today Energy*”, “*Physics and Chemistry of Solid State*”, “*Journal of Nano- and Electronic Physics*”, “*Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*”, “*Термоелектрика*”.

Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Робота містить 352 сторінки загального обсягу, з яких 271 сторінка основного змісту, включає 134 рисунки, 13 таблиць, список літератури зі 376 найменувань та додатки на 11 сторінках.

5. Цінність одержаних результатів для науки і практики.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше встановлено, що у тонких полікристалічних плівках РbТе товщиною до 2500 нм, отриманих на поліамідних підкладках, для яких поверхнева рухливість носіїв становить $\mu_{s(\text{PbTe})} = 7,5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, домінуючим механізмом розсіювання є дифузне розсіювання на поверхні, яке впливає на середню довжину вільного пробігу носіїв $\lambda \approx 260 \text{ нм}$, що враховано під час отримання плівок різної товщини.

2. Вперше показано, що для плівок SnTe з концентрацією носіїв заряду до $3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ та розмірами кристалітів порядку 100 нм, для яких міжбар'єрна рухливість становить $\mu_{s(\text{SnTe})} = 56,4 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, вплив міжзеренного розсіювання є домінуючим завдяки досить малим (менше 25 нм) розмірам кристалітів у латеральному напрямку та високій концентрації носіїв заряду, що дає можливість отримувати тонкі плівки з наперед заданими властивостями.

3. Вперше виявлено, що легування домішками Ві та Іп модифікованих структур телуридів призводить до значного збільшення коефіцієнта термоелектричної потужності порядку $44 \text{ мкВт}/\text{см}\cdot\text{К}^2$ для сполук на основі SnTe в широкому діапазоні температур, що спричинено ефектом формування резонансного рівня поблизу енергії Фермі внаслідок придушення біполярної провідності при високій температурі і, як наслідок, зменшення енергетичного розділення між валентними зонами легких і важких дірок.

4. Набули подальшого розвитку основні підходи одержання багат шарових термоелементів на основі низькотемпературних (до 600 К) сполук $\text{Ві}_2\text{Те}_3$ та середньотемпературних (до 900 К) термоелектричних матеріалів на основі легованого РbТе (n-тип) та GeTe (p-тип), що суттєво підвищило до 14 % ККД розроблених термоелектричних пристроїв з максимумами добротності ZT у багат шаровій структурі.

5. Вперше встановлено, що для полікристалічних шарів CdTe міжзеренні межі володіють домінуючим впливом на перенесення носіїв заряду та фотоелектричні властивості цих плівок. Так, за частот вище 100 Гц, електропровідність зростає за законом $\sigma \sim \omega^{0,54}$, що вказує на стрибкову провідність і свідчить про наявність локалізованих станів в тонких плівках CdTe,

які спричинені протяжними дефектами на границях зерен. Показано, що зменшення товщини плівки CdTe та вибору підкладки дає можливість збільшити фотопровідність, що важливо для керування фоточутливістю створених пристроїв на основі полікристалічних плівок.

6. Набула подальшого розвитку концепція побудови ІЧ-сенсорів на основі PbTe:In для діапазону довжин хвиль до 4,2 мкм, які функціонують за температур до 150 К, що забезпечується розробленим багатостадійним криогенним термоелектричним охолоджувачем. Перевагою такого сенсорного елемента є його функціонування за температур, вищих за температуру рідкого азоту.

7. Вперше запропоновано архітектуру гібридної сенсорної мікросистеми для визначення біомедичних показників людини, в основу якої покладено розроблений інтегральний перетворювач сигналів від діодних фоточутливих сенсорних елементів, які працюють в діапазоні довжин хвиль від 400 до 1040 нм. Перевагою цього перетворювача є можливість усунення постійної складової, амплітуда якої на порядки перевищує низькочастотний корисний сигнал, з динамічною зміною рівня компенсації, фільтрування сигналу та приведення його до діапазону АЦП.

Особливістю дисертаційної роботи Дзундзи Б.С. є її яскрава практична спрямованість. Усі отримані результати досліджень та їх теоретична інтерпретація спрямовані на вирішення проблем, що відносяться до твердотільної електроніки і походять з конкретної прикладної задачі.

Практична цінність дисертаційної роботи полягає у наступному:

Удосконалено методику непрямих вимірювань та розроблено засоби, що вперше дало змогу в одному технологічному циклі неруйнівними методами проводити повний цикл дослідження термоелектричних властивостей та значно зменшило затрати часу на проведення і обробку експериментальних даних.

Розроблено багат шаровий високоефективний термоелектричний модуль перетворення енергії для широкого робочого діапазону температур (300-900 К), який поєднує матеріали на основі твердих розчинів Bi_2Te_3 , середньотемпературні (на основі легованого PbTe), нові матеріали р-типу (на основі напівпровідникових сполук GeTe), легованих до 5 атомних % Bi, що дозволило суттєво знизити концентрацію дірок, рівень яких забезпечує оптимальне значення термоелектричної ефективності ZT при збереженні задовільних механічних властивостей, на відміну від високоефективного PbTe р-типу.

Розроблено термоелектричний перетворювач енергії на основі плівкових матеріалів р-типу $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ і n-типу $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ на тонкій поліамідній підкладці з безрозмірною термоелектричною добротністю $ZT = 0,6$ і ККД $\sim 3,6\%$ при різниці температур 100 К, що є вище у порівнянні з існуючими аналогами промислових мікроперетворювачів.

Створено систему керування термоелектричними охолоджувачами ІЧ-давачів на основі плівок PbTe, працездатних в діапазоні довжин хвиль 4,2 мкм за

температур 150 К.

Розроблено гібридну сенсорну мікросистему для біомедичних застосувань, яка дає змогу визначати індекс перфузії і забезпечує безперервний моніторинг роботи серця, дихання, параметрів крові людини.

Таким чином, робота Дзундзи Б.С. являє собою закінчене і цілісне дослідження з чіткою структурою і логічним викладенням матеріалу, написана технічно грамотно. Отримані у роботі результати є важливими для розробки високоефективних термоелектричних та фотоелектричних перетворювачів енергії на основі модифікованих сполук телуридів. Вірогідність і новизна висновків і рекомендацій сприймаються без заперечень. Викладення результатів теоретичних та експериментальних досліджень, моделювання та фізичних експериментів відповідає вимогам до наукових публікацій. Зміст реферату повністю відповідає тексту дисертації, а їх основні положення ідентичні.

Основні теоретичні положення роботи, висновки та рекомендації відображені в публікаціях автора в рейтингових наукових журналах, доповідях на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях.

Оформлення дисертації в цілому відповідає вимогам зокрема п. 7 та 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктор наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року №1197.

Стиль викладу матеріалів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття.

6. Оцінка змісту дисертації

Дисертація є завершеним і цілісним науковим дослідженням. Але, як і кожна наукова робота, розглянута дисертація не позбавлена певних недоліків. Серед них варто відзначити наступні:

1. Огляд літератури проведено на належному рівні. Проте було б доречним наведення у літературному огляді короткого аналізу досліджень можливостей застосування фотодетекторів в біомедичних мікросистемах неінвазивного аналізу стану здоров'я людини, хоча ретельний розгляд проводиться на початку відповідного розділу дисертації.
2. У роботі широко досліджено плівки на ситалі, слюді та скляних підкладках. Але чому немає досліджень, наприклад, на кремнієвих окислених пластинах? Такі дослідження розширили б межі застосування плівок, щоб вони могли бути вбудованими елементами кремнієвих технологій.
3. Розроблено методику отримання гнучкого тонкоплівкового термоелектричного генератора енергії. Проте не подано поперечний переріз структури приладу, було б легше до сприйняття і змістовніше.
4. Для усунення постійної складової, запропоновано диференціальну схему на операційних підсилювачах (рис. 6.28), з можливістю динамічно змінювати рівень компенсації постійної складової за допомогою цифро-аналогового

перетворювача мікроконтролера. Не описано як саме динамічно змінювати рівень постійної складової. Не вказано який сигнал поступає на вхід DAC2, рис. 2 і як він формується.

5. У дисертаційній роботі та в рефераті є також окремі стилістичні та орфографічні описки. Наприклад, на ст. 138 "...легууючої добавки..." замість "домішки", ст. 195 "...ефективних параметром...", ст. 287. "...поправочних коефіцієнтів...", ст. 290. "...12 бітний АЦП...".

7. Висновки

В цілому вважаю, що за актуальністю теми, ступеню обґрунтованості і достовірності отриманих результатів, наукової новизни і практичному значенню дисертаційна робота Дзундзи Б.С. «Твердотільні термо- і фотоелектричні перетворювачі енергії та сенсорні елементи на основі модифікованих структур телуридів» є завершеною самостійною науковою працею, яка відповідає вимогам зокрема п. 7 та 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктор наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року №1197, а її автор Дзундза Богдан Степанович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю – 05.27.01-твердотільна електроніка.

Офіційний опонент,
д.т.н., проф., професор кафедри біофізики
Львівського національного медичного
університету імені Данила Галицького



Марія ВІСЬТАК

